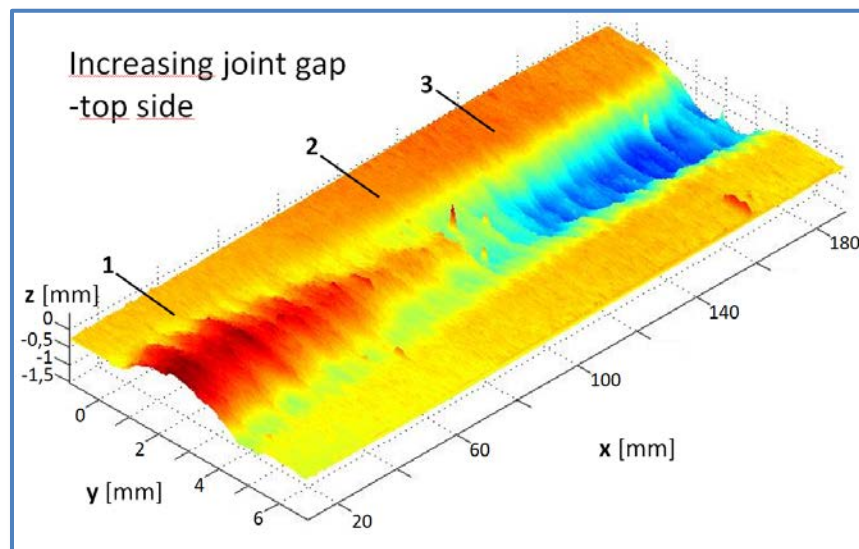


Publik slutrapport

Projekt:

ROBUHYB

Robust laserhybridsvetsning av tjockväggiga fordonskomponenter



Författare Jan Frostevarg och Alexander Kaplan, LTU

Datum 2013-01-28

Delprogram Hållbar produktionsteknik

Innehåll

1. Sammanfattning.....	3
2. Bakgrund	4
3. Syfte.....	7
4. Genomförande.....	8
5. Resultat	9
5.1 Bidrag till FFI-mål	15
5.2 Uppnådda projektmål	16
5.3 Projektets mål relativt programmets mål	16
6. Spridning och publicering.....	17
6.1 Kunskaps- och resultatspridning	17
6.2 Publikationer	18
7. Slutsatser och fortsatt forskning.....	19
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	19

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings-, innovations- och utvecklingsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Säkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör hälften.

För närvarande finns fem delprogram Energi & miljö, Fordons- och trafiksäkerhet, Fordonsutveckling, Hållbar produktionsteknik och Transporteffektivitet. Läs mer på www.vinnova.se/ffi

1. Sammanfattning

Laserhybridsvetsning, en kombination av laser- och ljusbågssvetsning, erbjuder högre produktivitet jämfört med de traditionella tekniker som ljusbågssvetsning som används idag genom höga svets hastigheter samt avancerade konstruktionsmöjligheter. Hittills används inte laserhybridsvetsning i svenska verkstadsindustrin, däremot finns det redan fler än hundra installationer i hela världen. Scania har ambition att implementera laserhybridsvetsning, men detta kräver utveckling av en robust process och en förbättrad förståelse av hur svetsen uppför sig i utmattningssituationer och då speciellt i relation till svetsens ytgeometri.

Processens robusthet studerades med en ny fullkontrollerad spårbar toleranssystematik. Detta möjliggörs genom att kartlägga parametrar, mäta och studera kantvariationer från formningen och genom att skapa förståelse för deras inverkan på den slutliga svetsen genom höghastighetsfilmning. Även den nya ljusbågssvetsprocessen CMT (Cold Metal Transfer) studerades tillsammans med lasersvetsning. Under projektet laserhybridsvetsades provbitar och fullskaliga fordonskomponenter med avseende på processens robusthet, återkopplad kvalitetskontroll, och utmattningsbeteende.

Grundläggande skillnader mellan tre ljusbågssvetsprocesser (Cold Metal Transfer - CMT, Pulsad, Standard) är undersökta för respektive process-funktion och process-stabilitet. Toleransfönster för svetsfogtyperna som förekommer på demonstratorn är undersökta för laserhybrid med CMT är kartlagda, som en ny teknik för tjockare plåtprodukter. Den nya systematiska mätmetoden (pre-, postscanning och höghastighetsfilmning) har vidareutvecklats och tillämpats på en komplex fordonsprodukt. För en lastbilbalk som demonstrator har alla tolv svetsdelsträckor kartlagts och optimerats. Utifrån resultat har sex tidsskriftsartiklar och fyra konferensartiklar skapats och presenterats.

Ett nytt projekt (EU-FP7, HYBRO) tar vid där ROBUHYB slutar. Projektet HYBRO fortsätter med samma demonstrator och fungerar därmed som en förlängning av ROBUHYB. Det prioriterades att satsas mer tid för att jämföra olika tekniker och kunna få ut ännu bättre resultat. Inom HYBRO ska dessutom två andra Scaniaapplikationer utforskas och det ingår också en 6 m lång demonstrator för ett franskt fordonsföretag. Förutom det är HYBRO ett bra tillfälle att samarbeta med världsledande partners inom tillämpning av den nya laserhybridsvetstekniken för höghållfast stål. Åtta balkar har redan 3D-robotsvetsats vid LTU i en fixtur levererad av Ferruform/Scania. Optimering av balksvetsning fortsatte när ytterligare åtta balkar först häftades av LTU och sedan svetsades hos Fronius (Österrike, ledande tillverkare av hybridsvetsutrustning) där fler felkällor uppenbarades och därmed också undvikas.

Hela kedjan från konstruktion (produktutveckling i Södertälje) och materialval till skärning/formning av kanter, svetsning, efterbehandling etc. (Ferruform i Luleå) analyserades från en ekonomisk och praktisk synvinkel, för att förbereda införandet av laserhybridsvetsning i produktion.

2. Bakgrund

Projektet ROBUHYB handlar om att introducera laserhybridsvetsning i Scantias tillverkning hos Ferruform/Scania i Luleå samt en planerad tillverkning av en annan produkt vid samma företag. Fabriken i Luleå med kring 600 anställda är Ferruform AB som är 100% dotterbolag till Scania. Scantias produktutveckling i Södertälje har också deltagit i projektet. Med dagens svetsmetod, MAG-svetsning, krävs bl a rotstöd, material som inte behövs användas vid laserhybridsvetsning.

För att kunna svetsa de olika applikationerna är det några förutsättningar som måste uppfyllas:

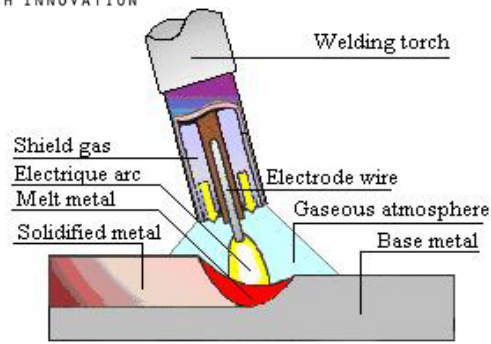
- Tillräcklig svetshastighet för att uppnå produktionsmål
- Tillräcklig effekt för att penetrationsdjupet skall uppnås
- Godkänd utmattningshållfasthet i svetsfogen
- Godkänd svets enligt standard SS-EN ISO 5817

Olika svetsmetoder

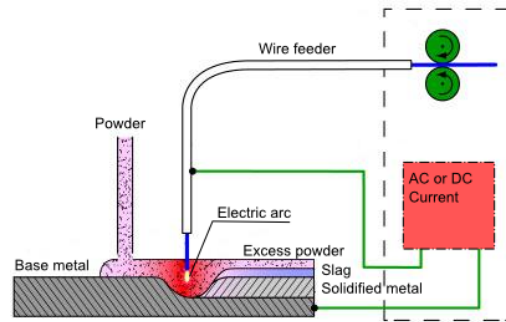
Idag används i verkstadsindustrin ofta MAG-svetsning eller pulverbågsvetsning som traditionella metoder. Ett lovande alternativ är lasersvetsning, som hög potential/hög risk metod. Lasersvetsning har nackdelen att spalter inte kan överbryggas men laserhybridsvetsning har egenskaper som kombinerar fördelarna av bägge metoderna. Laserhybridsvetsning är än så länge en metod som inte används i någon större utsträckning. Svetsande företag saknar den erfarenhet och trygghet som behövs för att implementera metoden i större skala. Laserhybridsvetsning behöver därför ytterligare utforskas och utvecklas, vilket är syftet med detta projekt. Av speciellt intresse för hybridsvetsning är möjligheten att använda den nya lasertypen fiberlaser med sina utmärkta egenskaper.

Laserhybridsvetsning

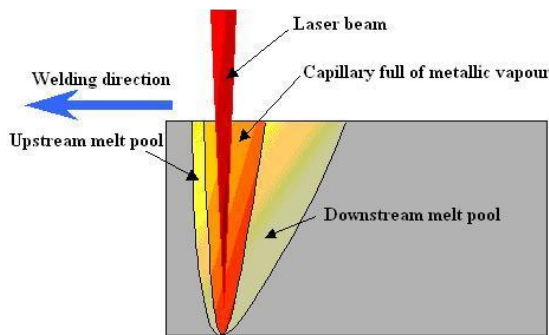
Det har varit känt i många år att kombinationen av en laserstråle, Fig. 1(c) och en ljusbågssvetsning (t.ex. MIG, MAG och TIG), Fig. 1(a), medför att många av de fördelar man har med de olika processerna sammanförs. Vid hybridsvetsning med laser-MAG, se Fig. 1(d),(e), ger lasersvetsningen hög svetshastighet och stor penetration med en bredare toppyta genom tillförsel av tillsatsmaterial via MAG. Samtidigt blir värmetillförselen lägre då svetshastigheten är väsentligt högre än vid ren MAG svetsning.



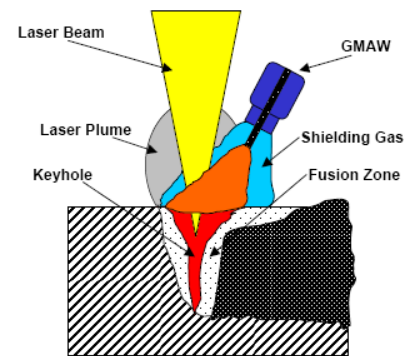
Figur 1(a) Skiss över MAG-svetsning



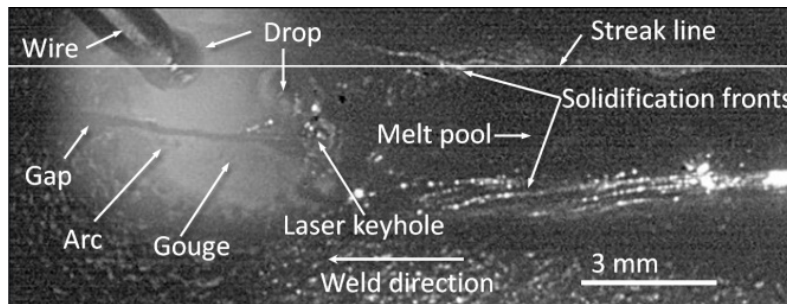
Figur 1(b) UP-svetsning



Figur 1(c) Lasersvetsning med nyckelhål



Figur 1(d) Lasersvetsning (Laser + MAG)



Figur 1(e) Höghastighetsbild av lasersvetsning (smältan, laser-nyckelhål, droppar, ljusbågen, fog)

Fig 1. Svetsmetoder, princip

Hybridsvetsningen ger en god spaltöverbrygging och metoden kan även bli billigare än ren lasersvetsning då värmeförseln från MAG-svetsen gör att en lägre lasereffekt kan användas.

Fördelarna jämfört med ren lasersvetsning:

- Högre svets hastighet
- Lägre kapitalkostnad, sänks med 30-40% eftersom lägre lasereffekt behövs
- Lägre krav på fogberedning
- Kontroll av fogbredden och fogens utformning, Fig. 3(d)
- Möjlighet att kontrollera de metallurgiska egenskaperna genom tillsatstråd

Nackdelar:

- Endast fåtalet användare, med andra ord så saknas det trygghet i processen
- Många parametrar att optimera
- Åtkomlighet vid komplexa geometrier

Dock finns det ett fåtal applikationer internationellt (fler än 100 i världen, kring 40 i Tyskland) som använder denna metod industriellt i en mycket stor skala. Meyer Shipyard, Tyskland, som bygger stora passagerarfartyg hybridsvetsar 50% (snart 75%) av 900 km/skepp, och som genom denna metod undviker dyra deformationskorrekturer (ca 20% av produktionskostnader). Inom bilindustrin används laserhybridsvetsning t.ex. av Volkswagen för svetsning av bildörrar eller av Mercedes-Daimler för komponenter. Dessutom står dock ett flertal applikationer inför en implementering inom branscher som kran, tåg, byggmaskiner, pipeline. I Sverige var det endast Duroc Rail AB i Luleå som från 2005 till 2012 har använt laserhybridsvetsning för stora höghållfasta stålplåtar till malmvagnar och lastbilsflak i industriell produktion (med en CO₂-laser, för Scania planeras en fiber- eller skivlaser med mycket kortare laservåglängd). ESAB har ett hybridsvetslaboratorium för sina kunder.

Produktionsperspektiv Scania

För att fortsätta vara starka på marknaden inom sitt segment måste Scania ligga i fronten för effektiv produktion och högsta kvalitet. Svetsningen är en nyckel teknik för företaget. Ferruform/Scania i Luleå förbrukar mest svetsstråd i hela Sverige! Scania är intresserad av högteknologiska metoder som lasersvetsning och hybridsvetsning eftersom det är metoder som kan höja deras produktivitet och kan möjliggöra en mer innovativ produktutveckling. Dock är laserhybridsvetsning ännu en sällan använd, hög potential/hög risk - teknologi som är svår att kontrollera (särskilt för den nya, annars lovande fiberlasertyp) och behöver utforskas för att få den trygghet och robusthet som krävs för att kunna användas i produktion.

Idag har Scania en helautomatisk linje som lasersvetsar axeltappar till bakaxelbryggor. Denna svetsning gjordes tidigare med MAG- och friktionssvetsning. Produktiviteten ökades betydligt (högre svets hastighet, mindre fräsning som efterbearbetning) kort tid efter installationen.

Jämfört med MAG/UP-svetsningen är Scania intresserade av laserhybridsvetsning framförallt av två orsaker:

- Högre svets hastigheter än vid enbart MAG svetsning
- Eliminera rotstöd, pga. den smala lasersvetsen

Jämfört med ren lasersvetsning föredras hybridsvetsning pga. följande fördelar:

- Större feltoleranser vid fogberedning kan tillåtas jämfört med ren lasersvetsning
- Man får en bredare toppyta där man kan kontrollera geometrin på denna. Detta ses som fördelaktigt/robust för utmattningshållfastheten.

2009 genomförde Scania tillsammans med LTU första året av ett ursprungligt treårigt projekt (kolla under "Övrigt") om hybridsvetsning (med en 15 kW-fiberlaser) av en bakaxelbrygga, dessutom tre ytterligare lastbilkomponenter. Deras (låg volym-) produktion flyttades utomlands! – än viktigare blir det då att ha konkurrenskraftiga svetsmetoder för de andra produkterna.

I projektet ROBUHYB studerades (i) påverkan av oxidskiktet på bindfel och undercuts och (ii) tre toleransdimensioner i fogberedning (bredd, mismatch, ytposition) på svetsgeometri som kunde tydliggöras och mätas med hjälp av en scanner (före/under/efter svetsning), (iii) svetsning av demonstratorer av slutliga produktgeometrier. Höghastighetsfilmning användes som viktig utgångspunkt för att identifiera ett robust processfönster. Tydliga teorier kunde skapas. Dessutom genomfördes omfattande parameterkartläggning och utvärdering, som delvis publiceras just nu. CMT (Cold Metal Transfer) ljusbågsvetsprocessen provades nyligen i kombination med laser, som direkt ledde till lovande resultat, som återigen kunde förstås genom höghastighetsfilmning.

3. Syfte

Projektet syftade till betydligt ökad produktivitet i komponenttillverkningen hos Scania och ska långsiktigt stärka Scantias konkurrenskraft. Det ska också ge möjligheter till avancerad produktutveckling, speciellt lättviktskonstruktion genom användande av stål med högre hållfasthet. Dessutom är hybridsvetsning miljövänlig pga mindre el- och materialförbrukning och viktminskning (eliminerad rotstöd i bakaxel; lättare konstruktion för tvärbalk).

Projektet ger också synergieffekter för andra fordonstillverkare i Sverige, speciellt för de som använder tjockare material, t.ex. Volvo AB (Volvo CE, Volvo Lastbil), Cargotec HIAB, BAE Hägglunds, samt andra komponentleverantörer.

Projektet ger förstärkning av forskningskompetensen och ny kunskap i Sverige, både för universitet, samt tillverkande- och leverantörsföretag (t ex ESAB, SSAB, Outokumpu, Sandvik).

Viktig pionjärsroll i Sverige (förhoppningsvis 2:a applikationen i produktion, fast 1:a nu inställd igen) som referens för att skapa trygghet hos ytterligare intressenter inom laserhybridsvetsning, särskilt med den nya fiberlasertypen.

För första gången presenteras en ny metod som kontrollerar spårbarhet av den fullständiga toleranskedjan: kartläggning av kanttoleranser, filmning och tolkning av processvariationer, uppmätning av variationer i svetsgeometri – som läser av hela toppytan vid svetsning av demonstratorer.

Studier av den nya processen Cold Metal Transfer (CMT) tillsammans med lasersvetsning.

4. Genomförande

Arbetet i projektet var indelat i fem arbetspaket med följande innehåll:

- WP 1. Utveckling av robust svetsprocess
- WP 2. Utveckling av robust svetsprocess med fogföljning
- WP 3. Laserhybridsvetsning av demonstratorer
- WP 4. Utmattningsprovning av demonstratorer
- WP 5. Analyser av beräkningar, svetsprov och utmattningsprovning, samt förstudie för införande

Projektet löpte i två år, från Q3 2011 till Q4 2013. Arbete som utfördes i de tidigare arbetspaketen tillämpades senare för fullstor demonstrator i nära industriella förhållanden. Arbetet planerades enligt schema nedan:

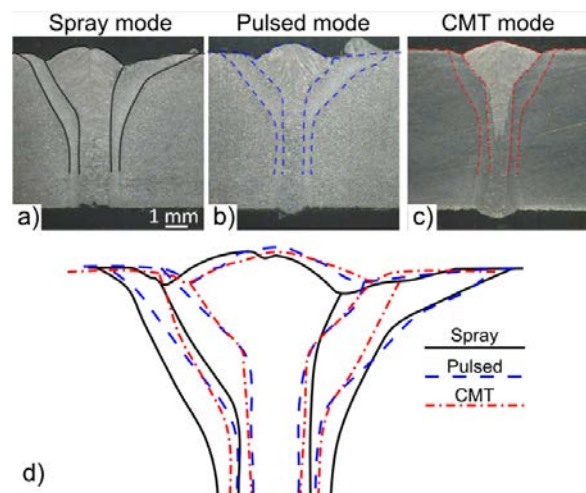
	År / kvartal	2011	'11	'12	'12	'12	'12	'13	'13	'13	2013
		/3	/4	/1	/2	/3	/4	/1	/2	/3	/4
WP1	Svetsprocess	x	x	L1 L2							
WP2	Svetsprocess/ fogföljning			x	x	M1 L3					
WP3	Svetsning demonstrator					x	x	x			
WP4	Utmattnings- provning						x	x	x	x	
WP5	Analyser, förstudie								x	x	M2 L4

Ett nytt EU-FP7 projekt, HYBRO, med LTU som koordinator och Scania som partner beviljades Q3 2012. Det är ett treårigt projekt med en budget av 1,6 mEuro, varav 950 kEuro EU-stöd, och är en utmärkt synergi för och fortsättning av ROBUHYB. Scantias demonstrator och LTUs kompetens kommer särskilt att gynnas av kompetens som finns inom projektet hos världsledande partners inom laserforskning (RWTH och Fraunhofer Aachen/DE), höghållfast stål (Arcelor/BE, Thyssen/DE), hybridsvetsutrustning (Fronius/AT) och genom en till

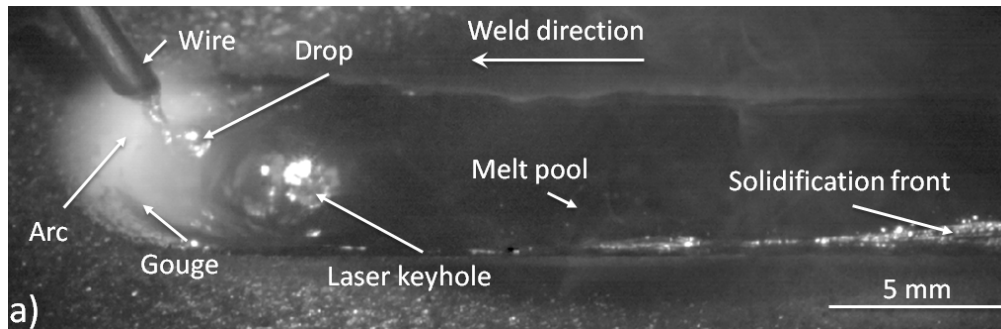
fordonsdemonstrator (Liebherr/FR). Genom det nya EU-projektet har applikationen fått en ny tidshorisont och omfattning, särskilt för att undersöka överföringen av kunskap och tekniken till andra applikationer hos Ferruform/Scania. Därför sköts en del av RobuHyb- projektet över till det nya HYBRO- projektet (WP4 samt delvis WP2 och WP5). Det visade sig dessutom att användandet av fogföljare blir alltför skrymmande för att kunna användas på demonstrator i fixtur. En del av fogföljningens roll kommer ändå att användas och simuleras på demonstratorerna genom skanning och mätning av ytor, fogvariationer och slutlig svetsgeometri.

5. Resultat

Idag används laserhybridprocessen oftast med en ljusbåge (med materialtillförsel) i pulsat läge. Fördelen med pulsat läge kontra kontinuerligt (Standard-) läge är en något lägre värmeförsel och mindre rök. Men framförallt möjliggörs robust materialöverföring även vid lägre trådmatningshastigheter. Förutom dessa två lägen finns det ett flertal andra lägen som inte används i lika stor utsträckning eftersom de oftast är specifika för olika tillverkare. En kortbågsprocess som snabbt blivit känd är den nya CMT- (Cold Metal Transfer) tekniken från Fronius (Österrike). Fördelar med denna metod är ännu lägre energitillförsel, mindre svetsdiken och mindre sprut, nackdelar är mindre penetrationsdjup och begränsad materialtillförsel. Grundläggande skillnader mellan tre ljusbågsprocesser (CMT, Pulsad och Standard) är undersökta för respektive process- funktion och stabilitet. Skillnader i svetsvärnittsgeometri som delvis beror på energitillförsel kan ses i Fig. 5.1. CMT- tekniken är speciellt utformad för tunnare plåt, men för laserhybrid har det i detta fall (7 mm) också visat sig fungera bra för tjockare material. Svetsprocesserna är även filmade med High Speed Imaging (HSI), en höghastighetsfilmningsteknik som gör det möjligt att se svetsprocessen trots det skarpa ljus som avges. En bild från en sådan film med annoteringar kan ses i Fig. 5.2.

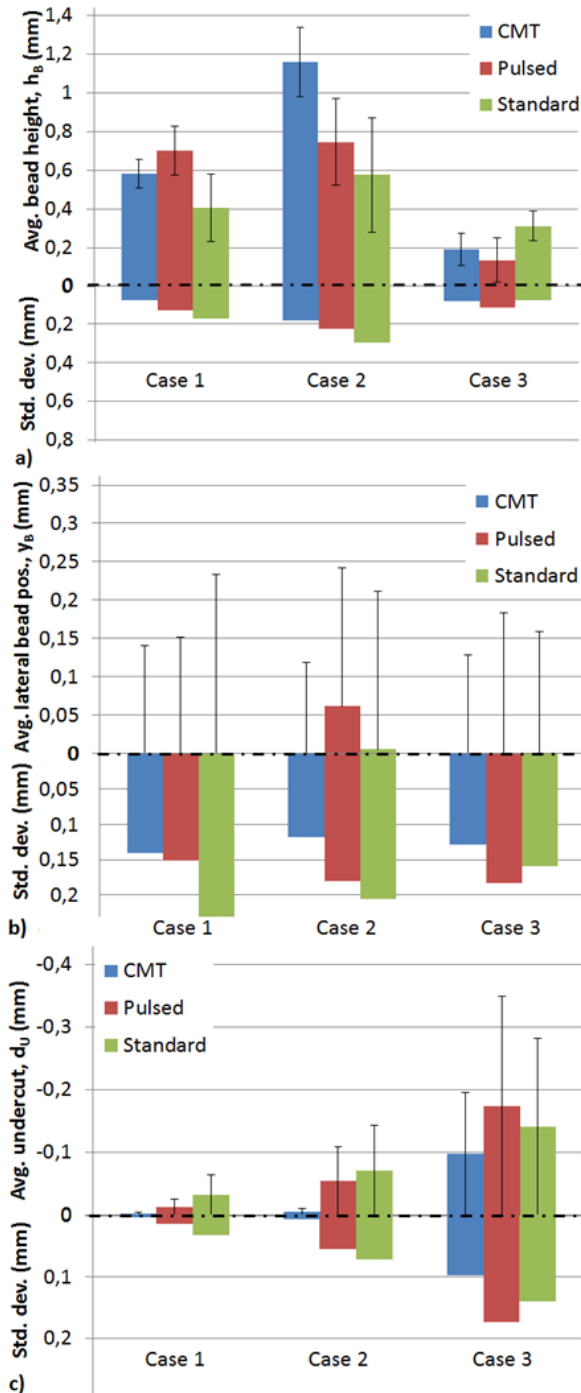


Figur 5.1. Jämförelse av svetsgeometri mellan olika ljusbågstekniker vid laserhybridsvetsning. a) Standard [Spray], b) Pulsad, c) CMT) och d) a-c överlagda



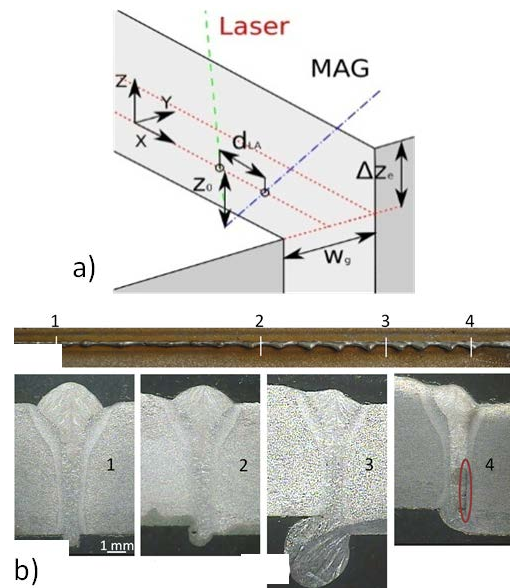
Figur 5.2. Bild från höghastighetsfilmad laserhybridsvets, med annoteringar

För att bättre följa fog så att fog inte missas och höjdskillnader för fogen kompenseras för är det lämpligt att använda en fogföljare. Eftersom demonstratorn kommer att vara laserskuren så kommer även provkupongerna att vara det, vilket fungerar bra för laserhybridprocessen. Det har visat sig tidigare [1] att oxider från valsning ger upphov till svetsdiken, därför etsas eller blåstras de bort på både demonstrator och provbitar. För svetestester på provkuponger användes befintlig fogföljare som skanner för datainsamling av svetsarnas ytgeometri. Då kan resulterande svetsar och robusthet mellan processerna bättre jämföras. Stabiliteten av resulterande svetsgeometri (som beror på processtabilitet) på laserskuren stumfog är jämförd för de tre olika laserhybridprocesserna och kan ses i Fig. 5.3. När processernas resultat jämförts framgår det att laserhybrid med CMT- tekniken ger de mest robusta resultaten och därför har den tekniken framförallt vidare undersökts, inklusive testning av toleransfönster för demonstratorns två huvudfogtyper, stum och T-fog. Optimering och jämförelse av processerna skedde med produktionsmässigt miljö och effektivitetstänk.

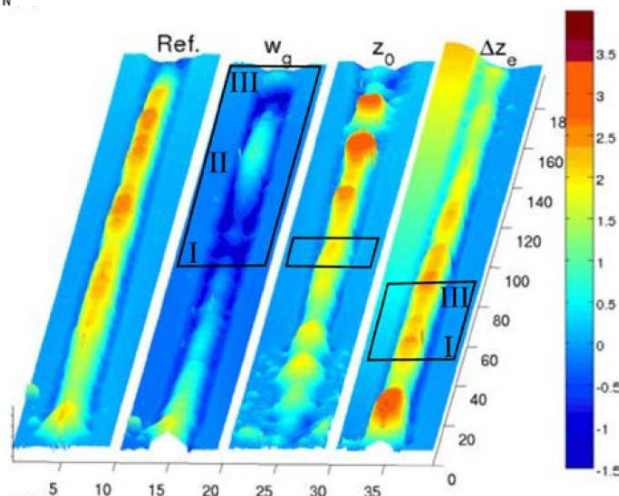


Figur 5.3. Stabilitetsjämförelse mellan tre olika ljusbåglägen på laserskuren stumfog; Cold Metal Transfer (CMT), Pulsad och Standard. Case 1: 2m/min, case 2: 5m/min och case 3: 1,5m/min med 0,6mm spalt. Standardavvikelse och medel- a) höjd, b) linjering mot fog och c) svetsdiken

För att kartlägga processtabilitet används en systematisk mätmetod som inkluderar ytprofilskanning och HSI. Tolerans-fönster fås genom att skanna ytan på demonstratorns fogar för att ta reda på rådande variationer, vilka sedan testas på provkuponger med en viss marginal samtidigt som processen övervakas av HSI. Därefter skannas den färdiga svetsen och en analys av processens robusthet kan utföras. Testning av toleransfönster har gjorts genom att med olika svetsprover, testa dessa geometriska variationer, Fig. 5.4, över svetsprovens längd med avvikelser som ligger utanför det uppmätta toleransfönstret. Geometriska variationer som kan uppstå är sidförskjutning av fog, spaltbredd och olika höjd på ena eller båda plåtarna som ska sammanfogas. Ett exempel på skannade ytor när dessa variationer testats kan ses i Fig. 5.5.

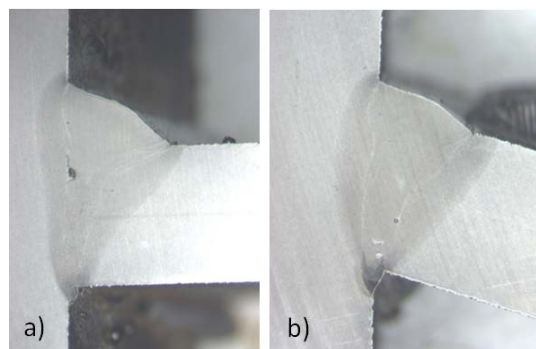


Figur 5.4. a) Illustration med dimensioner av möjliga geometriska fogvariationer. b) exempel på vad som händer om den ena plåten är förskjuten i höjddled



Figur 5.5. Skannade svetsytor där geometriska fogvariationer testats systematiskt

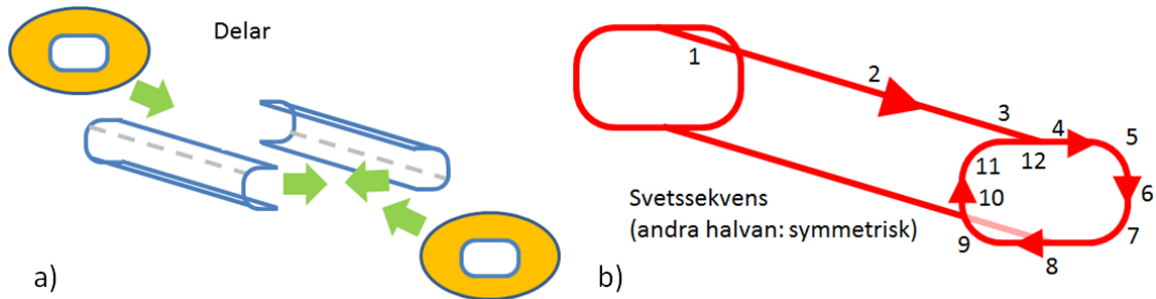
Uppsättning av hybridprocessen är på grund av framtida produktionsmål satt att vara samma som för stumfog, vilket processtekniskt inte är optimalt. På grund av ett oavsiktligt fel i skärprocessen fick demonstratorns balkhalvor varierande lutning och därmed också varierande spalt mellan sidorna för kälffogen mot ändstyckena. Det visade sig att toleransfönstret för processen i sidled från ändstycket är litet med denna uppsättning, endast $\pm 0,2\text{mm}$. Detta kräver mycket noggrann programmering och bannoggrannhet av robotens program för att få till godkända svetsar. Exempel på tvärsnitt på provkuponger med godkända kälffogsvetsar kan ses i Fig. 5.6. Ytgeometrin är viktigast för utmattning så förekomst av små mängder porer långt inne i svetsen behöver inte ytterligare minimeras.



Figur 5.6. Tvärsnitt för svetsexperiment för kälffog med a) I- och b) V-spalt

Efter att den systematiska mätmetoden (före- och efterskanning samt HSI) använts för att optimera (samt kartlägga processen och resultaten) de olika delsträckorna, kunde svetsning av demonstratorbalken utföras. Hur demonstratorbalken sätts ihop och vilka de olika delsträckorna är kan ses i Fig. 5.7. Delsträcka 1-3 på balkhalvorna svetsas tillsammans i en körning och är stumfog med I-spalt. Pga. åtkomstbegränsningar är svetshuvudet lutat i delsträcka 1 och 3 vilket kräver viss anpassning av processen. Delsträcka 4-12 sker i en körning där spalt varierar mellan delsidorna. Balkdelarna läggs

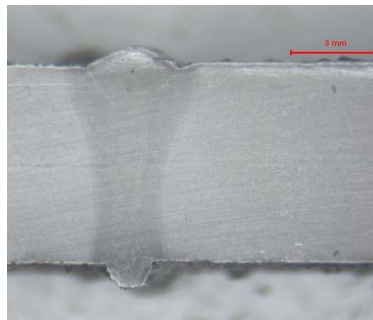
på plats i en fixtur gjord av Ferruform (Scania) och delarna häftsvetsas därefter ihop för att inte deformeras under svetsning. Svetsningen sker först på balkhalvorna och därefter längs balkens sidor mot de båda ändstyckena.



Figur 5.7. a) hur de olika balkdelarna (halvor och ändstycken) sätts ihop. b) delsträckor för svetsning av halva balken, 1-3 sker i en körning och 4-12 sker i en till

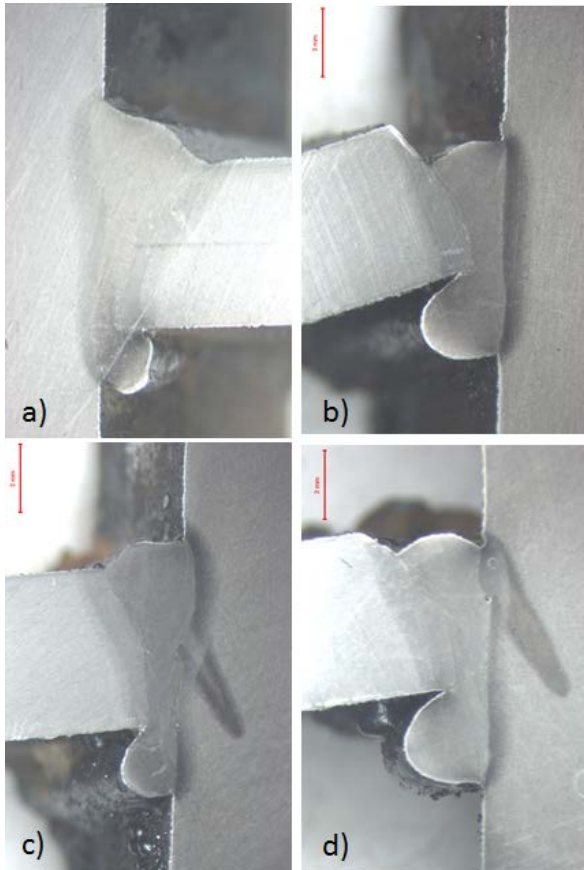
Att använda befintlig fogföljare på demonstratorbalken i fixtur visade sig vara omöjligt på grund av åtkomstproblem. Skannerhuvudet hamnar dels för långt bort från svetsprocessen, dels kommer den i vägen för svetsprocessen så att svetshuvudet inte kommer åt att svetsa hela sträckorna. En ny lösning av fogföljare som tar mindre utrymme och kommer närmare processen krävs för att kunna tillämpas. Alternativt kan en fogsökare som letar efter fog och omprogrammerar svetsbana innan svetsning, dock innebär det fördubblad tid för svetsning och det går emot en framtida produktionstakt.

Svetsning av delsträcka 1-3 fungerade bra på de flesta demonstratorbalkarna. Ibland förekom rotdropp och porer, främst när svetsgodset inte var rent innan svetsning (olja från pressformningen fanns oftast kvar). Figur 5.8 visar ett typiskt tvärsnitt av längdsvets på demonstratorbalk.



Figur 5.8. Tvärsnitt från längdsvetsen på färdigsvetsad demonstratorbalk (tjocklek 7 mm), i stort defektfri med undantag av några porer vid svetsens rotsida

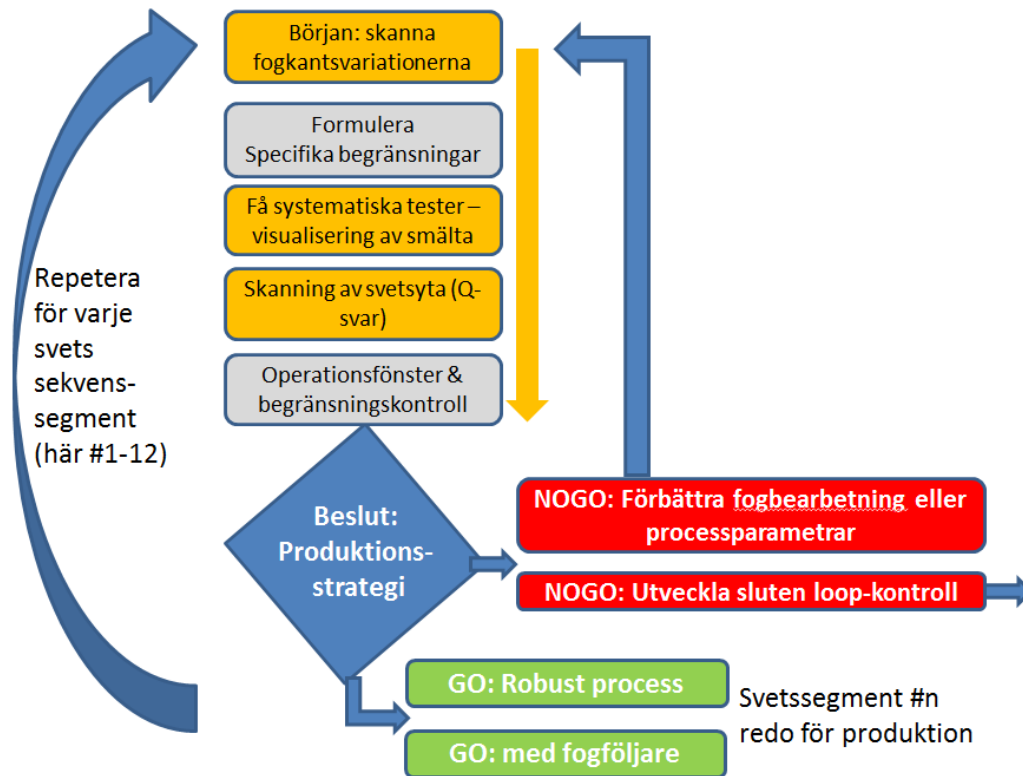
Svetsning av kälfgogen vållade fler problem och den största orsaken till dessa problem var varierande fog och smala processfönster. Många problem gällande robotstyrning (noggrannhet), strömkälla, linjering etc. redades ut och löstes, men ändå gick det inte att producera en balk som var fullgod längs hela kälfgogarna. När inga övriga felkällor fanns kvar togs beslut att förbättra processen genom att fräsa ner balkhalvorna så att det är en I-spalt längs hela kälfgogen. Detta var fortfarande inte tillräckligt pga smala processfönster (delvis beroende på krav på ej optimal uppsättning av laser-ljusbåge), utan det togs även beslut om att ett svetsdjup på 6 mm kan räcka (istället för full genomträngning 7 mm).



Figur 5.9. Tvärsnitt från svetsad kälfgog på demonstratorbalk. a) godkänd delsvets, b) nedsjunkning av svets, c) delad laserstråle och d) kombination av b-c)

Detta motverkar problem med nedsjunkning av svets och förstör därmed processfönstret, men kan också medföra försämrade utmattningsegenskaper. När dessa åtgärder togs kunde svetsar av god kvalitet erhållas, kvar återstår att lösa problem med nedsjunkning (på två ställen pga. värmeledning, alltid samma på varje balk) och förekommande delning av laser så att två nyckelhål skapas. Figur 5.9a-d visar tvärsnitt från svetsad kälfgog på demonstratorbalk, där a) visar en godkänd svets, b) visar det stora problemet som uppstod med nedsjunkning, i c) är laserstrålen delad, troligtvis pga. att laserstrålen reflekteras på svetstråden och d) visar en kombination av de båda. Porer förekommer, men för utmattning spelar dessa mindre roll och behöver därför inte minimeras ytterligare. Totalt har det i projektet svetsats 16 balkar, varav 6 med nästan fullgod kvalitet för utmattningstester. Ytterligare balkar kommer att svetsas och utmattningstesterna kommer att ske i det nya EU FP7-projektet HYBRO.

Från en analys av demonstratorsvetsandet och de problem som uppstått har flödesschemat i Fig. 5.10 tagits fram. Schemat är tänkt att användas som planeringsverktyg i framtida projekt för att åstadkomma tillförlitliga svetsar när dessa ska implementeras.



Figur 5.10. Flödesschema som planeringsverktyg för att säkerställa implementation av svetsning på demonstrator

På grund av det nya EU FP7-projektet HYBRO förlängs arbetet med demonstratorn och ytterligare svetsstekniker kan utforskas för att möjliggöra ännu bättre robusthet och ökade processfönster. Innehållet i WP4 (utmattningstester) har därmed flyttats framåt i tiden in i det nya projektet. Det innebär ett bra tillfälle att samarbeta med världsledande partners inom tillämpning av den nya laserhybridsvetsstekniken för höghållfast stål.

5.1 Bidrag till FFI-mål

Det har inom projektet skapats mycket resultat och kunskap för speciellt Scania, men även övrig svensk fordonsindustri, vilket kan leda till en konkurrenskraftig och snabb produktion med smarta lättvikts-konstruktioner. Demonstratorn är på väg att bli den förväntade pionjärs-applikationen av laserhybridsvetsning i den svenska industrin, särskilt pga. den medföljande implementeringsmetoden. Implementering av den nya moderna svetsstekniken laserhybridsvetsning kräver ett relativt högt produktionsunderlag för att vara finansiellt gångbart. När produktion startar kommer Scania att kunna producera starkare balkar till lägre pris och energiåtgång än de motsvarande balkarna som produceras idag. Dessutom medför investeringar i modern teknik även ny kunskap och vidareutveckling, det kan också motivera andra företag att också börja använda tekniken på andra typer av komponenter, vilket ökar kunskap och kompetens hos Scania och övrig

svensk fordonsindustri. Kontakt mellan Scania och LTU har stärkts och kommunikation kommer att fortgå både under och efter produktionsinförande.

5.2 Uppnådda projektmål

Leverabel 1 (L1): Kartläggning av det geometriska processfönstret har uppnåddts för den vridstyva tvärbalken (7 mm stum- och T-fog) och för bakaxelbryggan (10 mm stumfog).

Teorin för svetsprocessen har skapats på hög vetenskaplig nivå, särskilt ang formning av svetsdiken som avgörande kvalitetskriterium.

L2: Processfönster för optimerad laserhybridsvetsning har skapats med succé med en ny teknik, CMT-ljusbågen som för första gången används för tjock svetsning

En ny toleransspårningsmetod har skapats som nu är användbar.

Mål L3 och L4 har inte färdigställts eftersom det blev under projektets gång ett nytt, väldigt kompletterande EU FP7 projekt beviljat, kallat HYBRO, som LTU koordinerar och där Scania deltar. Då bestämdes att förskjuta svetsning och utmattningsprovning av demonstratorerna och fogföljning i HYBRO och istället fördjupa i ROBUHYB L1, L2.

L3: Utökad processfönster för fogföljning: har inte skapats; dock har fogföljningsutrustningen används mycket för scanning; grundläggande har tagits fram robustheten av processen ang. sidförskjutning som predikterar beteende av fogföljning; investering i en modernare utrustning behövs.

L4: Acceptabel demonstrator (bakaxelbryggan) som utmattningsprovas, jämförande analyser också för vridstyv tvärbalk, förstudie för beslutsfattande: har inte skapats; åtta demonstratorer har svetsats fast inte med tillfredställande svetskvalitet än (därför inte heller utmattningsprovade), pga. vissa praktiska aspekter som behöver redas ut, plus att processen optimeras vidare. I HYBRO är aktuellt svetsning och utmattningsprovning av flera demonstratorer under förberedelse. På början har prioritet bytts från bakaxelbryggan till istället vridstyv tvärbalk som mer krävande demonstrator, eftersom den blev mer aktuell. Dock har en del provbitar svetsats och processfönstar tagits fram för bakaxelbryggan.

5.3 Projektets mål relativt programmets mål

Som planerad uppnådde projektet de övergripande mål av programmet som står i ansökan:

Betydligt ökad produktivitet i komponenttillverkningen hos Scania som ska långsiktigt stärka Scantias konkurrenskraft. Det ger också möjligheter till avancerad produktutveckling, speciellt lättviktskonstruktion genom användande av stål med högre hållfasthet. Dessutom är hybridsvetsning miljövänlig pga. mindre el- och

materialförbrukning och viktminskning (eliminerad rotstöd i bakaxel; lättare konstruktion för tvärbalk).

Projektet ger också synergieffekter för andra fordonstillverkare i Sverige, speciellt för de som använder tjockare material, t.ex. Volvo AB (Volvo CE, Volvo Lastbil), Cargotec HIAB, BAE Hägglunds, samt andra komponentleverantörer.

Projektet ger förstärkning av forskningskompetensen och ny kunskap i Sverige, både för universitet, samt tillverkande- och leverantörsföretag (t ex ESAB, SSAB, Outokumpu, Sandvik).

Viktig pionjärsroll i Sverige (kan bli den 2:a applikationen i produktion, dessutom har den 1:a ställts in) som referens för att skapa trygghet hos ytterligare intressenter inom laserhybridsvetsning, särskilt med den nya fiberlasertypen.

Projektet har bidragit till en Lic-avhandling och kommer att ingå i en motsv. doktorsavhandling (Jan Frostevarg, tidigare Karlsson) och i en till Lic- och förhoppningsvis doktorsavhandling (Javier Lamas).

6. Spridning och publicering

6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Kunskaps- och resultatspridning har skett överhuvudtaget genom följande aktiviteter:

- Om projektet informeras på forskargruppens LTU-hemsida
- Publikationer i internationella vetenskapliga tidskrifter och på internationella konferenser enl. nedan
- Spridning internt hos Scania och Ferruform, bl a genom Scania's internt svetskompetensnätverk och genom olika möte inom konstruktion och produktion
- Fortsättning i EU-FP7-RFCS-projekt HYBRO där LTU är koordinator
- Spridning i tematisk liknande forskningsprojekt, särskilt FiberTube Advanced (VINNOVA), PROLAS (EU Interreg IV A Norr), IndLas (EU Mål 2), dessutom i uppdragsforskning (olika svenska företag, dessutom t ex SINTEF Trondheim/Norge och Aker Verdal/Norge)
- Spridning i nya samarbetsprojekt (utbyte) med liknande tematisk spetskompetens: Chosun University/Gwangju, KAIST/Daejeon, RIST/Pohang, alla Sydkorea (finansierad STINT), Osaka University, Japan (finansierad internt genom Osaka University)
- Spridning i svenska (Lasergruppen/Svetskommissionen) och internationella (IIW, EWF) nätverksorganisationer.

- Många dagliga samtal med relevanta svenska företag (t ex VCE, Gestamp, ESAB) och svenska forskargrupper (t ex KIMAB, HV, KTH, LTU-internt).
- Samtal i planering av nya nationella och internationella forskningsansökan
- Halvårliga seminarier genomförs på LTU där löpande projektresultat internt har spridats

6.2 Publikationer

Internationella vetenskapliga tidskriftspublikationer

1. Karlsson, J., P. Norman, J. Lamas, A. Yañez, A. F. H. Kaplan: Observation of the mechanisms causing two kinds of undercuts during laser hybrid arc welding, *Applied Surface Science*, v 257, pp 7501-7506 (2011).
2. Moradi, M., M. Ghoreishi, J. Frostevarg, A. F. H. Kaplan: An investigation on stability of laser hybrid arc welding, *Optics and Lasers in Engineering*, v 51, pp 481-487 (2013).
3. Moradi, M., M. Ghoreishi, J. Karlsson, T. Ilar, A. F. H. Kaplan: Parameter dependencies in laser hybrid arc welding by Design-of-Experiments and a mass balance, submitted (under revision) to *J Laser Appl* (2014).
4. Kaplan, A. F. H., J. Frostevarg and J. Powell: A procedure to fully control and trace the weld quality for laser-arc hybrid welding under production conditions, *Int. J. Manufacturing Research*, in press (2014).
5. Frostevarg, J., A. F. H. Kaplan and J. Lamas: Comparison of CMT with other arc modes for laser arc hybrid welding of 7 mm steel, submitted (under revision) to *Welding in the World* (2014).
6. Frostevarg, J. and A. F. H. Kaplan: Undercut suppression in laser arc hybrid welding by melt pool tailoring, submitted to *Journal of Laser Applications* (2014).

Internationella konferenser:

7. Kaplan, A. F. H., J. Lamas, J. Karlsson, P. Norman, A. Yañez: Scanner analysis of the topology of laser hybrid welds depending on the joint edge tolerances, 12th NOLAMP conference, June 27-29, 2011, Trondheim, Norway, Ed. E. Halmoy (2011).
8. Kaplan, A. F. H., J. Karlsson, J. Powell: A procedure to fully control and trace the weld quality for laser-arc hybrid welding under production conditions, *Proc. SPS 12*, Linköping, Nov. 6-8, 2012 (2012).
9. Karlsson, J., A. F. H. Kaplan: Comprehensive monitoring and control of laser hybrid arc welding in industrial production, *Proc. ICALEO*, Anaheim/LA, CA, USA, September 24-27, 2012, LIA, #605, pp 220-227 (2012).
10. Frostevarg, J. and A. F. H. Kaplan: Differences between arc modes in laser hybrid welding upon weld bead stability and undercut formation, *Proc. NOLAMP 14*, August 26-28, 2013, Gothenburg/Sweden (2013).

7. Slutsatser och fortsatt forskning

- En ekonomisk och teknisk väldig lovande men dock komplex svetsmetod, laserhybridsvetsning, har undersökts. Särskilt undersökt för en demonstrator av fordonskomponent
- Eftersom laserhybridsvetsningen inte används i svenska verkstadsindustrin idag, trots fler än 100 installationer i världen, kan projektet hos Scania leda till en pionjärsapplikation i Sverige med LTU som en världsledande forskargrupp.
- Den nya tekniken att kombinera laserstrålen även med CMT-ljusbågssvetsning visade sig vara lovande även för tjockare material.
- Robustheten ('beprovad teknik') är viktig för tillverkning i en industriell verkstadsmiljö; den nya analysmetoden som utvecklades (fog-scanner, processfilmning, svetsresultatsscanner) är lovande för att kvantitativt kunna fastställa robustheten och dess gränser.
- Ett EU-FP7 projekt har skapats, med LTU som koordinator och Scania/Ferruform som partner. Där fortsätter undersökningen av den aktuella, plus några ytterligare, applikationer. Detta sker gemensamt med världsledande parter inom svetsforskning, svetsssystemutveckling och fordonssvetsapplikationer.
- Ytterligare gemensamma forskningsprojekt planeras.
- Överhuvudtaget har ROBUHYB skapat utmärkta resultat om en fortfarande väldigt lovande svetsmetod, som på sikt kan ha hög ekonomisk och teknisk nytta för svenska fordonsindustrin.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner

LTU – Luleå tekniska universitet, Institutionen för teknikvetenskap och matematik (TVM), avdelning för produkt- och produktionsutveckling, 971 87 Luleå

Jan Frostevarg, doktorand, jan.frostevarg@ltu.se

Alexander Kaplan, professor, alexander.kaplan@ltu.se

Ferruform AB, Luleå

Mikael Juntti, mikael.juntti@ferruform.com

Scania, Södertälje

Erik Tolf, erik.tolf@scania.com

